

ВІДГУК

офіційного опонента, кандидата технічних наук, доцента, старшого наукового співробітника відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів (№ 22) Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України Кушнарської Ольги Сергіївни на дисертаційну роботу **Костецького Івана Володимировича на тему «Триботехнічні властивості модифікованих лазерною обробкою евтектичних плазмових покриттів»**, представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка

Дисертаційна робота Костецького Івана Володимировича присвячена актуальному науково-прикладному завданню підвищення зносостійкості, контактної витривалості та довговічності деталей машин і механізмів шляхом цілеспрямованого керування структурно-фазовим і напружено-деформованим станом евтектичних плазмових покриттів за допомогою двоетапної лазерної модифікації.

Актуальність обраного напрямку досліджень зумовлена тим, що працездатність значної кількості деталей авіаційної, транспортної та машинобудівної техніки визначається станом їх поверхневих шарів, які в процесі експлуатації зазнають інтенсивного тертя, циклічних контактних навантажень, локального нагрівання та дії комбінованих механізмів зношування. Застосування зносостійких покриттів є одним із найбільш ефективних шляхів підвищення ресурсу таких деталей. Водночас характерні для плазмового напилення ламелярна будова, пористість, міжламелярні межі, структурно-фазова неоднорідність і залишкові напруження можуть обмежувати реалізацію потенційно високих експлуатаційних властивостей покриттів.

У цьому аспекті застосований автором підхід, що передбачає поєднання суцільного лазерного оплавлення з подальшою дискретною сітчастостільниковою лазерною обробкою евтектичних покриттів систем Ni–Cr–B–Si та Fe–Cr–C–B, є актуальним і перспективним. Він спрямований не лише на підвищення твердості поверхневого шару, а й на комплексну зміну його структурно-фазового стану, дефектності, характеру залишкових напружень та механізмів зношування.

У дисертаційній роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, що мають теоретичне та практичне значення для розвитку прикладної механіки, трибології та інженерії поверхні. Робота є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому комплексно вирішується завдання підвищення триботехнічних характеристик евтектичних плазмових покриттів шляхом їх двоетапної лазерної модифікації.

Позитивною стороною роботи є комплексний характер проведених досліджень. Автором встановлено взаємозв'язок між параметрами лазерної

обробки, структурно-фазовим станом покриттів, їх мікротвердістю, пористістю, залишковими напруженнями та триботехнічними характеристиками. Особливу увагу приділено дослідженню закономірностей припрацювання та руйнування покриттів, їх контактної витривалості, а також математичному моделюванню й оптимізації технологічних параметрів лазерної обробки.

Дисертація містить анотації українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел і додатки. Загальний обсяг роботи становить 176 сторінок.

АНАЛІЗ ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено положення наукової новизни та практичне значення одержаних результатів.

Мета роботи логічно пов'язана з необхідністю теоретичного обґрунтування та експериментального встановлення закономірностей формування структурно-фазового стану, еволюції напружено-деформованого стану та триботехнічних властивостей евтектичних плазмових покриттів систем Ni–Cr–B–Si та Fe–Cr–C–B при двоетапній лазерній модифікації. Поставлені завдання охоплюють основні етапи дослідження — від аналізу сучасного стану проблеми до експериментального визначення структурно-фазових змін, дослідження напруженого стану, триботехнічних характеристик, математичного моделювання та оптимізації технологічних параметрів.

Позитивною рисою вступу є спрямованість дослідження на встановлення взаємозв'язку між технологічними параметрами лазерної обробки, структурою та фазовим складом покриттів, характером залишкових напружень і кінцевими триботехнічними властивостями. Така постановка завдання відповідає комплексному характеру сучасних досліджень у галузі інженерії поверхні.

У **першому розділі** виконано аналіз сучасного стану проблеми підвищення зносостійкості пар тертя з покриттями. Розглянуто основні механізми адгезійного, абразивного, втомного, корозійно-механічного, ерозійного та фретинг-зношування. Значну увагу приділено енергетичним підходам до аналізу процесів тертя і руйнування поверхневих шарів. Автором проаналізовано особливості формування евтектичних плазмових покриттів, їх структурну організацію та триботехнічні характеристики. Показано, що ламелярна будова, пористість, міжламелярні межі, оксидні включення та залишкові напруження, характерні для плазмового напilenня, можуть виступати концентраторами напружень і суттєво впливати на механізми руйнування покриття.

Окремо розглянуто традиційні та сучасні методи модифікації поверхневих шарів, серед яких термічна, хіміко-термічна та лазерна обробка. Обґрунтовано

перспективність лазерної модифікації евтектичних плазмових покриттів, проаналізовано особливості формування напружено-деформованого стану та градієнтних структур, а також закономірності припрацювання і руйнування модифікованих поверхневих шарів у трибологічних системах.

Проведений аналіз дозволив автору визначити основні напрями подальших експериментальних досліджень і сформулювати мету та завдання дисертаційної роботи. У цілому перший розділ логічно пов'язаний із подальшими експериментальними розділами дисертації та формує необхідне теоретичне підґрунтя роботи.

У **другому розділі** наведено характеристику матеріалів, технологічних режимів формування та модифікації покриттів, експериментального обладнання і методик дослідження. Обґрунтовано вибір евтектичних плазмових покриттів систем Ni–Cr–B–Si та Fe–Cr–C–B і матеріалів підкладок — сталі 45 та титанового сплаву ВТ6.

Детально охарактеризовано технологію плазмового напилення та двоетапної лазерної модифікації, що включає суцільне лазерне оплавлення і подальшу дискретну сітчасто-стільникову обробку. Наведено методики металографічних та електронно-мікроскопічних досліджень, рентгеноструктурного аналізу, визначення залишкових напружень методом $\sin^2\psi$, вимірювання мікротвердості та проведення триботехнічних випробувань.

Використаний комплекс методів дає змогу досліджувати покриття на різних структурних рівнях та зіставляти структурно-фазові зміни з фізико-механічними і триботехнічними характеристиками. Застосування математичного планування експерименту, регресійного та дисперсійного аналізу, а також багатокритеріальної оптимізації підвищує обґрунтованість отриманих результатів.

У **третьому розділі** наведено основні результати дослідження формування структури та стану евтектичних покриттів. Проведено порівняльний аналіз структурно-фазового стану покриттів після плазмового напилення, першої стадії лазерного оплавлення та другої дискретної лазерної обробки.

Показано, що вихідні плазмові покриття характеризуються типовою ламелярною структурою з наявністю міжламелярних меж, пористості та локальної структурної неоднорідності. Після лазерного оплавлення відбувається суттєва перебудова вихідної структури з формуванням більш щільного дендритно-евтектичного стану. Подальша сітчасто-стільникова лазерна обробка сприяє додатковому подрібненню структурних складових, більш рівномірному розподілу зміцнювальних фаз і зміні напруженого стану поверхневого шару.

Важливим результатом є встановлення впливу матеріалу підкладки на формування структури системи «покриття–основа». Особливу увагу приділено покриттям на титановому сплаві ВТ6, для яких лазерна модифікація

супроводжується більш інтенсивною взаємодією компонентів покриття з матеріалом основи.

Автором також досліджено зміну залишкових напружень та мікротвердості. Встановлено, що комплексна лазерна модифікація забезпечує підвищення мікротвердості покриттів на 31–44 % порівняно з напиленим станом. Важливим результатом є встановлення переходу від розтягувальних до стискальних залишкових напружень у покриттях на титановому сплаві ВТ6, що розглядається автором як один із чинників підвищення тріщиностійкості системи «покриття–основа».

У **четвертому розділі** наведено результати дослідження триботехнічних властивостей евтектичних плазмових покриттів після лазерної модифікації, розглянуто закономірності їх припрацювання, механізми зношування та контактної втоми, а також результати математичного моделювання й оптимізації технологічних параметрів.

Встановлено, що двоетапна лазерна модифікація суттєво зменшує інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя та одночасно підвищує контактну втому довговічність покриттів. Показано зміну характеру руйнування поверхневих шарів — від більш інтенсивного адгезійно-абразивного механізму в напиленому стані до більш стабільного дрібноабразивного після лазерної модифікації.

Заслужують на увагу результати дослідження контактної втоми, згідно з якими довговічність модифікованих покриттів збільшується у 4,5–6 разів, а глибина підповерхневих втомних тріщин зменшується у 2–2,5 рази. Встановлено, що найкращий комплекс триботехнічних властивостей забезпечує система Fe–Cr–C–B/ВТ6, тоді як покриття системи Ni–Cr–B–Si характеризуються більшою технологічною стабільністю та швидшим припрацюванням.

Важливою складовою четвертого розділу є математичне моделювання процесу припрацювання та багатокритеріальна оптимізація технологічних параметрів. Отримані результати дозволили визначити раціональні режими лазерної обробки та встановити взаємозв'язок між технологічними параметрами процесу і триботехнічними характеристиками покриттів.

ОБГРУНТОВАНІСТЬ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ, ЇХ ДОСТОВІРНІСТЬ ТА НОВИЗНА

Наукові положення, результати та висновки дисертаційної роботи є достатньо обгрунтованими. Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням комплексу взаємодоповнювальних методів дослідження, зокрема металографічного, рентгеноструктурного та електронно-мікроскопічного аналізу, визначенням залишкових напружень методом $\sin^2\psi$, вимірюванням

мікротвердості, триботехнічними та контактнo-втомними випробуваннями, а також застосуванням методів математичного планування експерименту, регресійного і дисперсійного аналізу.

Отримані експериментальні результати загалом є взаємоузгодженими: встановлені структурно-фазові зміни після лазерної модифікації корелюють зі зміною мікротвердості, пористості, залишкових напружень і триботехнічних характеристик покриттів. Це дало змогу автору перейти від констатації окремих експериментальних ефектів до встановлення взаємозв'язків між технологією формування поверхневого шару, його структурним станом і поведінкою в умовах тертя.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у встановленні закономірностей формування структурного та напруженого стану евтектичних плазмових покриттів систем Ni–Cr–B–Si та Fe–Cr–C–B за умов двоетапної лазерної модифікації.

Встановлено взаємозв'язок між послідовністю лазерного впливу, перебудовою вихідної ламелярної структури, диспергуванням структурних складових, зміною пористості та формуванням залишкових напружень у модифікованих поверхневих шарах. Важливим результатом є визначення впливу матеріалу підкладки на закономірності структурно-фазової взаємодії в системі «покриття–основа».

Науковий інтерес становить встановлений взаємозв'язок між зміною структурно-фазового та напруженого стану покриттів і трансформацією механізмів їх зношування та контактнo-втомного руйнування. Показано, що формування більш щільної та дисперсної структури в поєднанні зі сприятливим характером залишкових напружень супроводжується підвищенням опору зношуванню та контактній втомі.

Важливим науково-практичним результатом є також побудова регресійних моделей, що встановлюють взаємозв'язок між параметрами обробки та триботехнічними характеристиками досліджуваних покриттів і дозволяють у межах дослідженого факторного простору визначати раціональні технологічні режими.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні технологічного підходу до двоетапної лазерної модифікації евтектичних плазмових покриттів, визначенні раціональних режимів обробки та можливості використання встановлених закономірностей для підвищення зносостійкості й контактної витривалості поверхонь деталей машин і механізмів.

АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано наукові праці у фахових виданнях та матеріалах наукових конференцій. Тематика публікацій

відповідає основним напрямам дисертаційної роботи та охоплює питання формування структури евтектичних покриттів, їх лазерної модифікації, зміни фізико-механічних і триботехнічних характеристик.

Основні положення та результати дисертаційної роботи відображено у 10 наукових працях, з яких одна стаття у виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних (Scopus, Web of Science); 7 статей у фахових виданнях України, 2 праці опубліковано у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій. Опубліковані праці за темою дисертації містять результати особистої роботи автора на окремих етапах дослідження і відображають основні положення і висновки дисертаційної роботи.

Зміст опублікованих робіт відповідає тематичній спрямованості дисертації та спеціальності 131 – Прикладна механіка.

ВІДПОВІДНІСТЬ ДИСЕРТАЦІЇ ВСТАНОВЛЕНИМ ВИМОГАМ

Дисертаційну роботу оформлено відповідно до вимог, установлених Міністерством освіти і науки України щодо оформлення дисертацій. Роботу загалом викладено у науковому стилі, її структура є логічною та послідовною, а матеріал — систематизованим і добре аргументованим. Зміст дисертації повною мірою відображає хід виконаних досліджень, отримані наукові результати, їх теоретичне обґрунтування, практичне значення та сформульовані автором висновки, які відповідають поставленим меті й завданням дослідження.

ДИСКУСІЙНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ЗАУВАЖЕННЯ

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу, що виконана на високому науковому та методичному рівні, слід зазначити деякі зауваження, дискусійні питання та побажання:

1. В обґрунтуванні актуальності роботи недостатньо чітко окреслено ті аспекти дослідження евтектичних плазмових покриттів систем Ni–Cr–B–Si та Fe–Cr–C–B після двоетапної лазерної модифікації, які на момент виконання дисертаційної роботи залишалися недостатньо вивченими. Зокрема, твердження про відсутність системних досліджень процесів припрацювання, зношування та контактної втоми таких покриттів є дещо категоричним. Доцільно було б конкретизувати, які саме аспекти та закономірності залишалися недостатньо дослідженими, а також чіткіше відмежувати їх від уже відомих у літературі результатів.
2. Потребує додаткового обґрунтування вибір сталі 45 та титанового сплаву ВТ6 як матеріалів основи для порівняльних досліджень. Зазначені матеріали суттєво відрізняються за теплофізичними та механічними характеристиками, що безпосередньо впливає на тепловідведення, температурні градієнти, фазові перетворення та формування залишкових напружень під час лазерної обробки.

Доцільно було б чіткіше сформулювати критерії такого вибору та визначити роль матеріалу основи у встановлених закономірностях.

3. Потребує пояснення представлення кількості публікацій у вигляді «6,5» та «4,5». Доцільніше було б навести фактичну кількість опублікованих праць і окремо зазначити, скільки з них безпосередньо відображають основні результати дисертаційного дослідження.

4. Незважаючи на значний обсяг проаналізованих літературних джерел, у завершальній частині першого розділу недостатньо чітко сформульовано коло невіршених наукових питань, з яких логічно мають випливати мета та завдання дисертаційної роботи. Доцільно було б конкретизувати, які саме закономірності взаємозв'язку між параметрами двоетапної лазерної модифікації, структурно-фазовим і напружено-деформованим станом та триботехнічними характеристиками евтектичних покриттів залишалися недостатньо дослідженими та потребували подальшого вивчення.

5. У розділі 2 недостатньо аргументовано вибір геометричних параметрів дискретної сітчасто-стілньникової лазерної обробки. Потребує пояснення, за якими критеріями визначали крок, розмір комірки та ступінь перекриття лазерних доріжок, а також яким чином зміна цих параметрів впливає на теплові поля, структуру та розподіл залишкових напружень у покритті.

6. У підрозділі 3.1 при дослідженні структурно-фазового стану покриттів після плазмового напилення на титановий сплав ВТ6 наведено результати лише для покриття системи Ni-Cr-B-Si. Водночас у підрозділі 3.2 при аналізі впливу першого лазерного оплавлення на титановій основі розглядаються вже обидві системи покриттів – Ni-Cr-B-Si та Fe-Cr-C-B. Таким чином, для системи Fe-Cr-C-B/ВТ6 відсутня характеристика структурно-фазового стану у вихідному стані після плазмового напилення, що ускладнює коректне порівняння та кількісну оцінку структурних змін, спричинених лазерним оплавленням. Доцільно було б навести відповідні вихідні дані для цієї системи.

7. У розділі 3 при аналізі структурно-фазових перетворень покриттів після першого лазерного оплавлення та другого етапу лазерної обробки за сітчасто-стілньниковою схемою переважно наведено якісний опис змін мікроструктури, тоді як кількісні характеристики структурних складових представлено переважно для вихідного стану після плазмового напилення. Доцільно було б навести та узагальнити кількісні дані щодо зміни розмірів основних структурних і фазових складових, товщини характерних прошарків та перехідних зон для всіх досліджених систем «покриття–основа» після кожного етапу лазерної модифікації. Представлення таких результатів у вигляді узагальнювальної таблиці дало б змогу наочніше простежити динаміку структурно-фазових перетворень і провести порівняльний аналіз досліджених покриттів на різних етапах обробки.

8. У розділі 3 детально досліджено структурно-фазові зміни, напружено-деформований стан та мікротвердість евтектичних покриттів після першого і другого етапів лазерної модифікації. Водночас недостатньо чітко визначено внесок окремих структурних чинників у формування підвищених експлуатаційних властивостей покриттів. Зокрема, потребує уточнення, який із встановлених чинників - подрібнення дендритно-евтектичної структури, формування дисперсних карбідних і боридних фаз, зменшення пористості чи зміна характеру залишкових напружень - є визначальним у формуванні експлуатаційних властивостей покриттів, або ж їх покращення є результатом сукупної дії зазначених чинників. Доцільно було б конкретизувати роль і відносний внесок цих структурних факторів для досліджених систем «покриття—основа».

9. У розділі 4 автор пов'язує підвищення зносостійкості після двоетапної лазерної модифікації зі зміною механізму зношування від адгезійно-абразивного до переважно дрібноабразивного. Доцільно було б кількісно підтвердити цей висновок результатами аналізу поверхонь тертя та продуктів зношування, оскільки лише морфологічна оцінка поверхні не завжди дає змогу однозначно визначити внесок окремих механізмів руйнування.

10. У розділі 4 при математичному моделюванні процесу припрацювання та багатокритеріальній оптимізації недостатньо чітко окреслено межі застосовності отриманих моделей і регресійних залежностей. Доцільно було б конкретизувати, для яких систем «покриття—основа» та діапазонів технологічних і трибологічних параметрів вони є адекватними, а також оцінити можливість їх використання для інших евтектичних покриттів і режимів лазерної модифікації.

11. У тексті дисертації наявні окремі редакційні та технічні неточності: порушено послідовність нумерації та посилань на формули в розділах 3 і 4; у підрозділі 3.5 відсутні посилання на табл. 3.3-3.5; наведено помилкові посилання на рис. 4.10 замість рис. 4.7 та на табл. 3.3 замість табл. 3.2. У розділі 1 потребують упорядкування посилання на літературні джерела, а окремі дані інших авторів наведено без відповідних посилань.

Наведені зауваження мають переважно дискусійний та рекомендаційний характер, не знижують наукової цінності отриманих результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Костецького Івана Володимировича на тему **«Триботехнічні властивості модифікованих лазерною обробкою евтектичних плазмових покриттів»** є завершеною самостійною науковою працею, у якій отримано нові науково обґрунтовані результати, спрямовані на вирішення актуального науково-прикладного завдання підвищення

зносостійкості та контактної витривалості евтектичних плазмових покриттів шляхом керування їх структурно-фазовим і напруженим станом за допомогою двоетапної лазерної модифікації.

Мету дисертаційної роботи загалом досягнуто, а поставлені завдання виконано. Отримані результати мають наукове та практичне значення, достатній рівень обґрунтованості та експериментального підтвердження. Основні положення роботи відображено в наукових публікаціях здобувача.

За змістом, обсягом виконаних досліджень, рівнем наукової новизни та практичним значенням отриманих результатів дисертаційна робота відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Костецький Іван Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
відділу фізико-хімічних
досліджень матеріалів (№ 22)

Інституту електрозварювання
імені Є.О. Патона НАН України



Ольга КУШНАРЬОВА

Підпис офіційного опонента

к.т.н., старшого наукового співробітника

О.С. Кушнарьової засвідчую:

ТВО ученого секретаря

Інституту електрозварювання
імені Є.О. Патона НАН України



Павло ТКАЧ